

УДК 621.928.3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ В КОНУСЕ ЦИКЛОННОГО АППАРАТА

Василевский М. В., Зятиков П.Н., Деева В.С., Дозморов П.С., Никонов Ю.М.
Шишмина Л.Ф.,

Томский политехнический университет, Томск

E-mail: zpavel@niipmm.tsu.ru

Циклонные аппараты являются важнейшим элементом в системах обеспыливания газов в производствах энергетической, химической и других видов продукции. Однако усовершенствование методов расчета

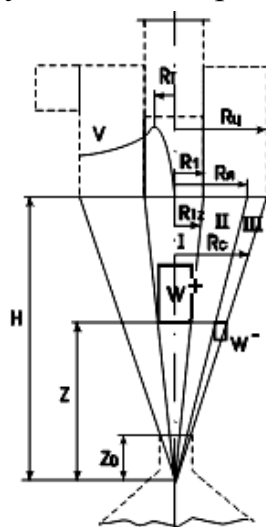


Рис. 1. Схема потоков в циклоне

эффективности по сепарированию частиц в этих аппаратах до сих пор являются предметом многих исследований [1]. На практике широкое распространение получил метод оценки фракционной эффективности сепарации с использованием интеграла вероятности случайной величины [2]. В работе [3] показано, что введение частиц пыли в пристенную область не гарантирует их попадания в пылеприемник и 100% улавливания. Тер-Линден [4] построил кривые равной эффективности сепарации частиц, вводимых в различные точки сепарационного объема. Оказалось, что эти кривые проходят через точки расположенные на оси, т.е. частицы, введенные ниже

входного сечения выходного канала на оси, оказываются пойманными с той же степенью эффективности, что и частицы, введенные на периферии. По данным Кизина [3] частицы, введенные в верхнюю точку оси конической части, улавливаются более эффективно, чем частицы, введенные в периферийную область верхней части циклона.

Приведенные данные показывают, что из центральной области происходит отвод частиц на периферии посредством диффузионного переноса в область высоких центростремительных ускорений, которая находится в окрестности радиуса $R_m < R_1$ – радиус выходного патрубка. Окрестность радиуса R_m является зоной перехода от квазитвердого вращения газа к квазипотенциальному. Установлено, что центральная область является областью эжекционного воздействия на приосевые течения и областью интенсивного отвода частиц. Интенсивность турбулентности здесь достигает более 40%, тогда как в прямых каналах интенсивность турбулентности потока не превышает 2%. Процесс поступ-

ления высококонцентрированного потока в приемник по периферии и выход из приемника потока с низкой концентрацией в приосевую область также объясняется эжекционными эффектами.

В противоточном циклоне в каждом сечении конуса в приосевой области потоки направлены вверх, в сторону газовыводного патрубка, в периферийной области – вниз, в сторону пылевыводного канала. Схематично области движения потоков через сечения, нормалью к оси, представлены на рис.1. Зона I – приосевое движение из приёмника с присоединёнными токами из сепарационного пространства в газовыводящий газопровод. Зона II – зона радиального перемещения газа – ядро – из периферийной области в приосевую. Зона III – зона периферийной области – области струйного течения и пристенного слоя.

В зоне I существует подзона квазитвёрдого вращательного движения и квазипотенциального течения, в зоне II – квазипотенциальное вращение. В периферийной области: граница ядра $d^2\Gamma / dR^2 = 0$; граница струйной области $d\Gamma / dR = 0$; пограничный слой $d\Gamma / dR \ll 0$ [5], $\Gamma = R \cdot V$, V – окружная скорость; R – текущий радиус. Суммарный массовый расход газа через каждое сечение, перпендикулярное оси циклона, равен нулю, т.е. расходы газов в нисходящем и восходящем течениях равны между собой. Суммарный расход пыли через каждое сечение постоянен и равен количеству пыли, выделившейся из потока в приёмнике, или, иначе, равен расходу пыли на входе в циклон, умноженному на коэффициент очистки. Последнее утверждение вытекает из условия не накопления пыли в выделенном отсеке конуса при балансе потоков пыли через поверхность замкнутого контура отсека. Для упрощения дальнейших вычислений примем, что аксиальные скорости в восходящем и нисходящем потоках распределены равномерно по радиусам, причём зона нисходящих токов в соответствии с рекомендациями [5] в периферийной области определяется выражением:

$$\frac{R_{\text{ц}} - R_{\text{я}}}{R_{\text{ц}}} = 1 - r_{\text{я}} = 0.235 + 0.07 \cdot b,$$

b – ширина входного патрубка; $\frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{ц}}} = r_{\text{я}}$, $R_{\text{ц}}$ – радиус цилиндра циклона.

Для высокоэффективных циклонов $1 - r_{\text{я}} = 0.25 \div 0.26$. Из рис.1 следует, что образующие конических поверхностей, разграничивающих указанные зоны, имеют следующие значения:

$$\frac{R_{1z}}{R_{\text{ц}}} = r_{1z} = r_1 \frac{Z}{H}; \frac{R_{\text{я}z}}{R_{\text{ц}}} = r_{\text{я}z} = r_{\text{я}} \frac{z}{H}; \frac{R_{\text{ц}z}}{R_{\text{ц}}} = r_{\text{ц}z} = \frac{z}{H}, \frac{R}{R_{\text{ц}}} = r.$$

Расходы газа в каждом сечении:

$$Q_z = W^+ \pi R_u^2 r_1^2 \left(\frac{z}{H} \right)^2 = W^- \pi R_u^2 (1 - r_y^2) \left(\frac{z}{H} \right)^2; \frac{W^-}{W^+} = \frac{r_1^2}{1 - r_y^2} = \text{const.} \quad (1)$$

Расход пыли конкретной фракции в каждом сечении:

$$G_z = Q_{\text{ex}} C_{\text{ex}} \eta_\delta = W^+ \pi r_1^2 R_u^2 C_{\text{ex}} \eta_\delta = 2\pi W^- \int_{R_{yz}}^{R_{cz}} CR dR - 2\pi W^+ \int_0^{R_{1z}} CR dR. \quad (2)$$

Деля левую и правую части (2) на $\pi R_u^2 \cdot U_u C_{\text{ex}} = Q_{\text{ex}} C_{\text{ex}}$, получим

$$\eta_\delta = \frac{2}{1 - r_y^2} \cdot \int_{r_{cz}}^{r_{cz}} cr dr - \frac{2}{r_1^2} \int_0^{r_{1z}} cr dr. \quad (3)$$

В этих уравнениях η – эффективность улавливания частиц размером δ ; C_{ex} – концентрация частиц размером δ в газе; c – текущая концентрация частиц размером δ в газе, Q – расход газа.

Будем полагать, что присутствие частиц не влияет на движение газа, $W^- = \text{const}$; $W^+ = \text{const}$; показатель степени n в распределении окружных скоростей в квазипотенциальной зоне имеет одно и то же значение в различных сечениях, перенос частиц в радиальном направлении оценивается потоком частиц в осреднённом относительном их движении при воздействии на них центробежных сил и турбулентного диффузионного потока. Уравнение переноса в радиальном направлении имеет вид

$$C \Delta u|_z = \varepsilon \frac{dC}{dr} |_z, \quad (4)$$

$$\Delta u = \frac{V^2}{R} \tau, \quad \tau = \frac{\delta^2 \rho_\delta}{18 \nu \rho}, \quad \Delta \bar{u} = \frac{\Delta u}{U_u}; \quad v_{\text{ex}} = \frac{V_{\text{ex}}}{U_u},$$

$$\Delta \bar{u} = k \frac{\nu^2}{r} \text{Stk}; \quad \text{Stk} = \frac{U_u \tau}{R_u}, \quad \nu = \frac{v_{\text{ex}} r}{r_T^{n+1}}$$

при $r < r_T$, $\nu = \frac{v_{\text{ex}}}{r^n}$ при $r > r_T$; $U_u = \frac{Q}{\pi R_u^2}$. Здесь Q – расход газа в цик-

лоне, R_u – радиус циклона; δ – диаметр частиц; ρ_δ , ρ – плотность частицы и газа, ν – коэффициент кинематической вязкости; n – показатель в уравнении $\nu \cdot r^n = \text{const} = v_{\text{ex}} \cdot 1^n$. $k < 1$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при отклонении от стоксовского обтекания в

условиях воздействия пульсаций [6]. Величина n меняется по высоте в диапазоне 0,2–0,7 [7].

Для упрощения расчёта представим $\Delta \bar{u} = Stk \cdot A / r$, где A находится

из соотношения $\int_{r_*}^1 \frac{A}{r} r \cdot dr = \int_0^1 \frac{v^2}{r} r \cdot dr \Rightarrow A = \frac{\int_0^1 v^2 \cdot dr}{1 - r_*}$; величина r_* вы-

бирается из условия $\int_0^{r_*} v^2 dr = \int_{r_*}^{r_T} v^2 dr$.

Для сечения z : $r_{*z} = r_* \cdot \frac{Z}{H}$; $r_{Tz} = r_T \cdot \frac{Z}{H}$.

Тогда $A_z = v_{ex}^2 \left(\frac{H}{z} \right)^{2n} \frac{3 - r_T^{1-2n}(n+1)}{3(1-2n)(1-r_*)}$, $\varepsilon = \frac{V_{ex} \cdot a \cdot b}{2\pi H(n+1)}$.

здесь a, b – высота и ширина входного патрубка.

Обозначим $\alpha = \frac{\Delta u_z R_{u_i}}{\varepsilon} = \frac{\Delta \bar{u} 2\pi h(n+1)}{v_{ex} \cdot \bar{a} \cdot \bar{b}}$.

Уравнение переноса (4) в безразмерном виде запишется

$\frac{c\alpha_z}{r} = \frac{dc}{dr}$ при $r > r_{*z}$, $c_z = c_{0z}$ при $r \leq r_{*z}$

$$c_z = c_{0z} \left(\frac{r}{r_{*z}} \right)^{\alpha_z} \quad (5)$$

Расчёт показывает, что в выражении (3)

$\int_0^{r_1(z)} Cr \cdot dr = C_{0z} \left[\frac{r_*^2}{2} + \frac{r_1^{\alpha_z+2} - r_*^{\alpha_z+2}}{r_*(\alpha_z+2)} \right] \left(\frac{z}{H} \right)^2$, и с учётом (5):

$$\frac{C_{0z}}{C_{ex}} = \frac{\left(\frac{H}{Z} \right)^2 \eta_\delta r_*^{\alpha_z} (\alpha_z + 2)}{\frac{1 - r_{я}^{(\alpha_z+2)}}{1 - r_я} - \frac{1}{2r_1} (2r_1^{\alpha_z+2} + \alpha_z r_*^{\alpha_z+2})} \quad (6)$$

Таким образом, может быть представлено распределение концентраций по соотношению (5) с учётом (6); например, для циклона СК-ЦН-34 при распределении фракционных эффективностей [2].

$$\rho_{\delta} / \rho = 2000; R_{\eta} = 0.15 \text{ м}; U_{\eta} = 1.7 \frac{\text{м}}{\text{с}}; v = 1.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$h_k = 4; r_1 = 0.34; \bar{a} \cdot \bar{b} = 1.3 \cdot 0.43;$$

$$\bar{r}_* = 0.6 \cdot r_1; r_T = 0.8 \cdot r_1; n_{cp} = 0.55; h = H // R_{\eta} = 5,61; k = 1$$

$$\delta(\text{мст}) \quad \begin{matrix} 1 & 3 & 5 \\ \eta & 0.41 & 0.82 & 0.91 \end{matrix}$$

вверху циклона относительная концентрация частиц размером 3 мкм на оси и периферии равны 0,41 и 1,5 соответственно, а в области пылевыводного отверстия равны соответственно 0,37 и 36.

Эта работа была поддержана в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета

Список литературы:

1. М.В. Василевский, Е.Г. Зыков, А.С. Разва, Расчетная модель концентрирования частиц в противоточном цилиндрическом циклонном аппарате. Теоретич. основы хим. технологии, **45**, № 3, 7 (2011)
2. Под ред. А.А. Русанова, Справочник по пыле- и золоулавливанию (Энергия, Москва, 1983)
3. М.Г. Кизин, Методы расчета и рекомендации по газовым циклонным аппаратам (Владимир. исследовательский институт синтетических смол, Владимир, 1970)
4. A.J. Ter Linden, Cyclone Dust Collectors for boilers, Trans. ASME. **75**, (1953)
5. А.Н. Штым, Аэродинамика циклонно-вихревых камер (Дальневосточный ун-т, Владивосток, 1985)
6. Е.П. Медников, Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей (Наука, Москва, 2009)
7. М.В. Василевский. Обеспыливание газов инерционными аппаратами (Изд. Томск. Политех. Универ, Томск, 2008)